

**Full screw probe를 사용한 5456-H116 합금의 마찰교반 프로세싱 시
회전속도에 따른 기계적 특성평가**
**Evaluation of mechanical characteristic with rotating speed in friction stir processing
by full screw probe for 5456-H116**

박재철^{1*}, 한민수², 장석기³, 김성종⁴

- (1*) 목포해양대학교 기관시스템 공학부 대학원
- (2) 목포해양대학교 기관시스템 공학부 대학원
- (3) 목포해양대학교 기관시스템 공학부
- (4) 목포해양대학교 기관시스템 공학부

1. 서론

1991년 영국의 용접기술연구소(TWI)에서 마찰교반용접 기술을 개발하여 지속적으로 연구되어져 왔으며 최근에는 항공이나 조선과 같은 수송기계 산업분야에 적용되고 있고 친 환경적이고 경금속인 알루미늄과 마그네슘 합금에 관한 연구가 활발히 진행되고 있다. 마찰교반용접 기술은 공구와 모재간의 상대적인 운동을 통해 마찰열을 발생시켜 재료를 연화시킨 후 기계적인 교반에 의한 고상접합법으로 이러한 마찰교반용접 기술의 특성을 응용하여 재료의 미세조직 변화와 결정립 미세화에 의한 기계적 특성을 향상시키기 위한 기술로 마찰교반 프로세싱 기술이 부각되고 있다. 마찰교반 프로세싱은 재료 자체의 특성 뿐만 아니라 고속으로 회전하는 공구의 형상과 이송속도 및 회전속도의 변화 등 다양한 공정변수가 재료의 특성변화에 큰 영향을 미치는 기술이며, 앞으로 이에 대한 다양한 연구가 필요한 실정이다.

본 연구에서는 알루미늄 선박용 재료로 사용되는 금속 중 하나인 5456-H116 합금에 대하여 이전에 규명한 바 있는 최적 공구를 사용하여 동일 이송속도에서 공구의 회전속도를 변수로 하여 최적의 마찰교반 프로세싱 조건을 규명하고자 한다.

2. 본론

본 실험에 사용된 모재는 Al-Mg합금(5000계열) 중에서 5456-H116을 사용하였다. 모재의 크기는 150mm × 150mm × 5t의 판재로 가공하였으며, 공구를 고속으로 회전시키면서 모재의 내부에 삽입한 후 롤링방향으로 마찰교반 프로세싱을 실시하였다. 공구의 형상은 어깨 직경 20φ, 프루브 길이 4.5 mm, 나사의 피치 1mm, 직경이 6φ인 전나사형 프루브(Full Screw Probe)이고, 이송속도는 15mm/min이며, 전진각 3°, 회전방향은 반시계방향으로 고정하여 실시하였다. 전 연구에서 공구의 형상과 이송속도의 최적의 조건은 전나사형 프루브(Full Screw Probe), 15mm/min의 이송속도로 규명한 바 있다. 마찰교반 프로세싱 완료 후 시편의 기계적 특성을 평가하기 위해 모재 롤링방향에 대하여 직각 방향으로 시험을 실시하였으며 인장시험 후 모재와 최적조건인 마찰교반 프로세싱한 시편편의 파단면을 주사전자현미경으로 관찰하였으며, 마찰교반 프로세싱된 시편을 Keller 용액에 침적시켜 횡단면 표면을 에칭한 후 광학현미경을 사용하여 미세조직의 변화와 소성유동의 거동을 관찰하였다.



Fig. 1 15mm/min에서 회전속도 변화에 따른 시편 외관

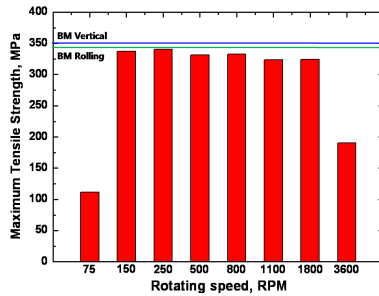


Fig. 2 회전속도 변수에 따른 최대인장강도 평균 비교

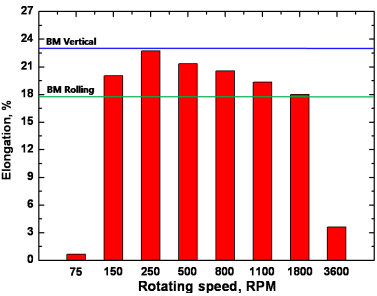


Fig. 3 회전속도 변수에 따른 연신율 평균 비교

RPM	Max. Tensile strength (MPa)	Yield strength (MPa)	Elongation (%)	Absorption energy (Kgf-mm)
BM-V	350.5	206	23.11	11076.83
250	340.3	174.4	22.74	10140.26

Table. 1 5456-H116 합금의 모재와 250RPM의 조건에서 마찰교반 프로세싱된 시편의 기계적 특성 비교

Fig. 1은 5456-H116 시편에 대하여 전나사형 프루브를 사용하여 15mm/min의 이송속도에서 회전속도 변수로 다양한 조건에서 마찰교반 프로세싱을 실시하였을 경우, 시편 외관을 보여주고 있다. 최적의 이송속도 15mm/min에서는 모재에 기계적 교반에 의한 충분한 입열량이 발생하고 소성변형이 이루어져 150, 250, 500, 1100, 1800RPM의 조건에서는 비트면이 깨끗한

형상을 나타내었으나, 75RPM과 3600RPM의 경우에는 비드가 상당히 거칠고 보이드가 형성되었다. 75RPM의 경우, 낮은 회전 속도로 인하여 소성유동을 위한 마찰열이 충분히 발생하지 않았기 때문에 사료된다. 반면, 3600RPM의 경우는 마찰력이 충분히 발생하여 소성유동은 촉진되었지만 교반 효과가 감소되어 보이드가 형성된 것으로 사료된다.

Fig. 2는 각 회전속도에 따른 마찰교반 프로세싱을 실시한 시험편에 대한 최대인장강도를 비교한 그래프이다. 먼저 모재의 경우 인장시험 시 직각방향에서 350.50MPa, 롤링방향에서는 347.36MPa를 나타냈다. 마찰교반 프로세싱된 시험편의 경우, 75RPM과 3600RPM을 제외한 대부분의 조건에서 비슷한 최대인장강도를 나타내고 있으며, 250RPM의 조건에서는 340.30MPa로 최대인장강도가 가장 높은 값을 나타냈다. 한편, 항복강도를 상호 비교한 결과, 모재의 경우 직각방향으로 항복강도가 206.52MPa를 나타냈으며, 롤링방향의 경우 231.20MPa를 나타냈다. 마찰교반 프로세싱된 시험편의 경우, 75RPM, 3600RPM을 제외한 대부분의 조건에서 유사한 항복강도를 나타냈으며, 그 중 150RPM의 경우가 185.61MPa로 가장 높은 값을 나타냈다.

Fig. 3은 회전속도 변수에 따른 연신을 평균을 비교한 그래프이다. 모재의 경우 직각방향으로 23.11%, 롤링방향으로 17.86%를 나타냈다. 마찰교반 프로세싱된 시험편에서 회전속도 250RPM의 경우가 22.74%로 가장 높게 나타났으며, 75, 3600RPM을 제외한 대부분의 조건에서 유사한 연신율을 나타내었다. 모재와 회전속도 250RPM의 조건에서 마찰교반 프로세싱된 시험편의 기계적 특성을 비교한 결과를 Table. 1에 나타내었다. 결과적으로 인장시험 후 기계적 특성을 평가해 볼 때 전나사형 프루브를 사용하여 15mm/min의 이송속도에서는 250RPM의 이송속도가 가장 우수한 특성을 보인 것으로 판단된다.

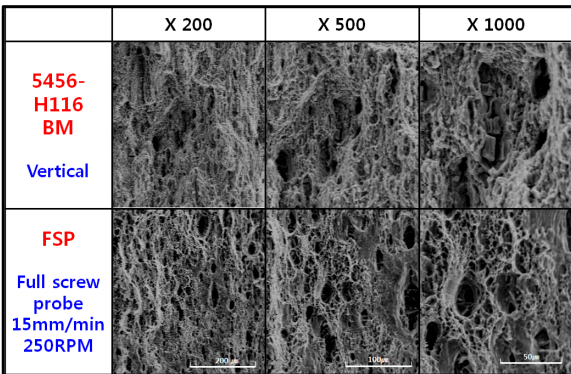


Fig. 4 5456-H116 합금 모재와 마찰교반 프로세싱 최적 조건의 파단면 분석

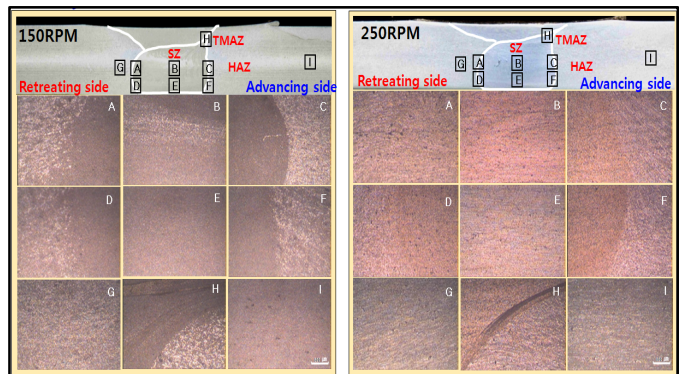


Fig. 5 마찰교반 프로세싱된 시험편의 횡단면 미세조직 관찰

Fig. 4는 5456-H116 합금의 모재와 최적의 마찰교반 프로세싱한 시험편의 인장시험 후 파단면을 주사전자현미경을 사용하여 관찰한 것이다. 모재의 경우 전체적으로 딩플 파면의 형상이 나타났으며, 부분적으로 준벽개형인 취성 파괴의 파단면이 관찰되었다. 마찰교반 프로세싱한 시험편의 경우, 모재와 거의 유사한 정도의 딩플형 파면이 관찰되었으며 부분적으로 준벽개 파면의 형상이 관찰되었다.

Fig. 5는 교반에 의한 소성유동의 거동을 관찰하기 위하여 이송속도 15mm/min에서 양호한 기계적 특성을 나타낸 150RPM과 250RPM의 회전속도 변수를 적용한 마찰교반 프로세싱된 시험편의 횡단면을 에칭한 후 미세조직을 관찰한 것이다. 150RPM에 비하여 250RPM의 경우가 프루브의 교반작용에 의해 형성된 오니온링(Onion ring)과 열적-기계적 영향부(TMAZ)와의 경계면이 매끄럽게 형성되었음을 알 수 있었다. 또한, 두 조건의 경우 모두 공구의 회전방향과 이송방향이 일치하는 Advancing side가 Retreating side보다 경계면이 뚜렷하게 나타났다. 이는 Advancing side의 경우, 기계적 운동방향이 일치함으로써 교반이 잘 이루어져 계면이 뚜렷히 형성되었지만, Retreating side의 경우는 상반된 기계적 운동으로 인하여 교반효과가 감소되어 계면 형성이 원활하게 이루어지지 못하였다. 또한 결정립의 크기를 관찰한 결과, 교반부(SZ)에서 기계적 운동에 의해서 결정립이 모재보다 감소하였음을 알 수 있었으며, 열영향부(HAZ)에서는 마찰열에 의한 결정립의 성장을 관찰 할 수 있었다.

3. 결론

선박용 알루미늄 합금 재료인 5456-H116 합금에 대한 다양한 공정변수를 적용하여 기계적 특성을 평가한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- [1] 회전속도 변수에 따른 시험편 외관은 75RPM과 3600RPM에서 거친 비드형상과 보이드가 관찰되었으며, 기계적 특성도 다른 조건에 비하여 열악한 특성을 보여주었다.
- [2] 단면 미세조직 분석결과, 회전속도가 증가함에 따라 충분한 마찰열이 발생하여 소성유동이 원활하였고, 계면의 형성이 뚜렷하였다. 또한, 미세 결정립의 관찰결과, 교반부에서는 미세결정립의 크기가 작아졌으며 열영향부에서는 열에 의한 영향으로 결정립이 성장하였다.
- [3] 알루미늄 5456-H116 합금에 대하여 공구의 회전속도에 따른 실험 결과, 모재와 유사한 기계적 특성을 나타낸 전나사형 공구를 사용한 15mm/min, 250RPM인 경우가 최적의 마찰교반 프로세싱 조건으로 판단된다.

감사의 글 : 본 연구는 교육과학기술부와 한국산업기술재단의 지역혁신인력양성사업으로 수행된 연구 결과임